



TITLE:

低炭素鋼におけるマルテンサイト およびベイナイトの低温脆性と微 視組織の関係(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

坪井, 瑞記

CITATION:

坪井, 瑞記. 低炭素鋼におけるマルテンサイトおよびベイナイトの低温脆性と微視組織の関係. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20366>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-03-31に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	坪井 瑞記
論文題目	低炭素鋼におけるマルテンサイトおよびベイナイトの低温脆性と微視組織の関係		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、低炭素鋼（Fe-2Mn-0.1C (mass%) 合金）におけるラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性破壊挙動と微視組織の相関を、組織学・結晶学的な観点および破壊力学に基づいた解析によって調査・議論した実験研究結果を取りまとめたものであり、5章からなっている。</p>			
<p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。鉄鋼材料は、自動車等の輸送機器、高層ビルや橋梁の建材などに幅広く使用されている代表的な構造用金属材料である。近年、燃費向上と温室効果ガスの排出量削減を目的とした輸送機器の軽量化や、建築物の衝撃荷重に対する安全性・耐久性の向上が社会的に重要な課題となっており、鉄鋼材料の高強度化を目指した研究が盛んに行われている。しかし、鉄鋼材料は強度レベルの上昇に伴って塑性変形能が低下し、特に BCC 相から成る鋼は低温度域において脆性的に破壊することが知られている。この現象は低温脆性と呼ばれており、重大事故に繋がる危険性を内包する。そのため、低温脆性の抑制が、新たな高強度鉄鋼材料を開発・実用化していく上で克服すべき重要課題の一つとなっている。多くの高強度鉄鋼材料は、ラスマルテンサイト組織もしくはベイナイト組織を有している。これらの組織はラス、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒といった大きさの異なる種々の微視組織で構成されており、組織内部にラス境界、ブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といった結晶学的に異なる様々な境界・粒界を有している。これらの境界・粒界は低温脆性破壊におけるクラック伝播の障害として働くと考えられるため、低温脆性破壊挙動とラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の相関を正確に把握し、低温脆性を支配する微視組織単位を特定していくことが、低温脆性破壊機構を解明していく上で重要である。これまでラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性に関して数多くの研究がなされているが、精密な組織学・結晶学的解析に基づいて、ラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性破壊挙動を調べた研究報告例はほとんどなく、低温脆性を支配する微視組織単位については、未だ統一的な見解が得られていないのが現状である。本研究では、ラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織を有する低炭素鋼（Fe-2Mn-0.1C (mass%) 合金）の低温脆性破壊挙動を、SEM / EBSD 法によって組織学・結晶学的な観点から精密に解析するとともに、低温脆性破壊特性におよぼす微視組織の影響を破壊力学に基づいた解析手法によって定量的に評価しようとするものである。</p>			
<p>第2章では、ラスマルテンサイト組織における低温脆性破壊挙動と微視組織の関係を調べている。破面の3次元プロファイル解析と SEM / EBSD 法による結晶方位解析を組み合わせた破面の結晶学的解析手法を新規に構築し、ラスマルテンサイト組織の低温脆性破壊は BCC 金属のへき開面である {001} 面に沿って生じることを明確に示している。また、マイクロクラックの伝播と微視組織の関係を SEM / EBSD 法により詳細に解析し、従来から議論されてきたブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といった境界・粒界の種類とは関係なく、隣接する領域の {001} へき開面の方位差が</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	坪井 瑞記
<p>大きい境界・粒界が低温脆性破壊の伝播に対して有効な障害になることを見出している。そして、マルテンサイト変態およびベイナイト変態の素過程である Bain 格子変形において、同一の<001>軸を共有する Bain 変形によって生成するバリエーション間の{001}面の角度差が小さいことに着目し、同じ Bain 変形によって生成するバリエーションの集合 (Bain unit) が、低温脆性を支配する微視組織単位である可能性を提案している。</p> <p>第3章では、第2章で提案した Bain unit という微視組織単位に着目し、Bain unit サイズと低温脆性破壊特性（延性-脆性遷移温度）の関係を調べている。まず、オーステナイト化処理後のベイナイト変態温度を変化させることで、Bain unit サイズを $4.3\ \mu\text{m}$ ~ $17.9\ \mu\text{m}$ と変化させたベイナイト組織を得ることに成功している。そして、$-175\ ^\circ\text{C}$ ~ 室温までの種々の温度で微小シャルピー衝撃試験を行うことによって、Bain unit サイズの異なるベイナイト組織の延性-脆性遷移温度を測定し、Bain unit の微細化に伴い延性-脆性遷移温度が低下することを明らかにしている。さらに、Bain unit サイズ以外に低温脆性破壊挙動に影響をおよぼすと考えられる因子（炭化物の析出状態、転位密度、引張特性）を精密に定量化し、Bain unit サイズが変化してもこれらの因子はほとんど変化しないことを明確に示した上で、延性-脆性遷移温度の低下は Bain unit の微細化に起因しており、Bain unit がラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性を支配する微視組織単位であると結論付けている。</p> <p>第4章では、Bain unit の微細化により低温脆性破壊特性が向上した要因を、クラック進展開始抵抗およびクラック伝播抵抗の観点から検討している。異なる Bain unit サイズを有するベイナイト組織に対して、引張試験時の荷重-変位曲線から J 積分値を測定し、破面トポグラフィ解析によってクラック成長量を精密測定することによって、種々の温度での J 抵抗曲線を正確に作成することに成功している。そして、得られた J 抵抗曲線を解析することによって、クラック進展開始抵抗およびクラック伝播抵抗を定量評価し、Bain unit の微細化によってクラック進展開始抵抗とクラック伝播抵抗がともに向上することを明らかにしている。さらに、有限要素法解析により算出したマイクロクラック近傍の引張応力から、破壊クラックが Bain unit 間の境界を越えて進展開始するための局所的な破壊靱性値を評価し、局所的な破壊靱性値の最大値は Bain unit サイズによらず同程度の値であることを見出している。これらの結果から、Bain unit サイズが微細である場合、破壊初期に生じるマイクロクラック長さが短いためにマイクロクラック先端における応力集中の度合いが低くなる結果、Bain unit の微細化によってクラック進展開始抵抗が向上するものと考察している。また実験的に得られた局所的な破壊靱性値は、理想脆性体を仮定した Griffith 理論から予測される値よりも非常に大きいことを見出し、Bain unit の微細化によるクラック進展開始時およびクラック伝播時の塑性緩和量の増加も、低温脆性破壊特性の向上に寄与していることを示している。</p> <p>第5章は総括であり、本研究で得られた結果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低炭素鋼 (Fe-2Mn-0.1C (mass%) 合金) におけるラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性破壊挙動と微視組織の相関を、組織学・結晶学的な観点および破壊力学に基づいた解析によって調査・議論した研究結果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. ラスマルテンサイト組織の低温脆性破壊クラックと微視組織の関係を SEM / EBSD 法により詳細に解析し、従来から議論されてきたブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といった境界・粒界の種類とは関係なく、隣接する領域の{001}へき開面の方位差が大きい境界・粒界が低温脆性破壊の伝播に対して有効な障害になることを明らかにした。
2. マルテンサイト変態およびベイナイト変態の素過程である Bain 格子変形において、同一の<001>軸を共有する Bain 変形によって生成するバリエーション間の{001}面の角度差が小さいことに着目し、同じ Bain 変形によって生成するバリエーションの集合 (Bain unit) が低温脆性を支配する微視組織単位である可能性を提案した。さらに、Bain unit サイズを変化させたベイナイト組織に対して、種々の温度で微小シャルピー衝撃試験を行うことによって、Bain unit の微細化に伴い延性-脆性遷移温度が低下し、低温脆性破壊特性が向上することを実験的に証明した。この結果は、低温脆性を克服した新たな高強度鉄鋼材料の創製に繋がる特筆すべき成果であり、実用展開への応用も期待されるものである。
3. 破面トポグラフィ解析によって正確に作成した J 抵抗曲線を解析することによって、Bain unit サイズを変化させたベイナイト組織のクラック進展開始抵抗およびクラック伝播抵抗を定量評価し、Bain unit サイズの微細化に伴って低温脆性破壊特性が向上する要因を、クラック進展開始抵抗とクラック伝播抵抗の観点から明らかにした。

以上の成果をまとめた本論文は、低炭素鋼のマルテンサイト組織およびベイナイト組織において、{001}へき開面の方位差が小さいバリエーションの集合である Bain unit が、低温脆性を支配する微視組織単位であることを初めて見出し、さらに Bain unit サイズの微細化に伴って低温脆性破壊特性が向上する要因を、クラック進展開始抵抗とクラック伝播抵抗の観点から明らかにしたものであって、学術上寄与するところが少なくない。また、本論文で得られた成果は、今後の低温脆性破壊研究における指針的な役割を果たすだけでなく、低温脆性を克服した新たな高強度鉄鋼材料の創製に対して有益な情報を与えることが期待される。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 2 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成 32 年 3 月 30 日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。